УДК 674.053:621.935:006.354

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ЛЕНТОЧНЫХ ПИЛ ПО ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

А.А. Кондратюк*, В.К. Шилько**

*Томский политехнический университет. E-mail: publish@tpu.ru
**Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: docent46@yandex.ru

Приведена методика расчета долговечности работы ленточных пил в соответствии с ГОСТ 25.504-82 при учете циклического характера работы ленточных пил по знакопеременным нагрузкам. Использованы выводы корректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, двухпараметрические методы схематизации процессов нагружения ленточных пил в соответствии с ГОСТ 25.101-83, методы составления блоков нагружения в соответствии с ГОСТ 25.507-85, применяя которые можно прогнозировать наступление отказов ленточных пил вследствие обрывов. На скорость роста усталостных трещин, а следовательно и на циклическую долговечность ленточных пил существенное влияние оказывают касательные напряжения, несмотря на их незначительный уровень в общей картине нагружения.

Ресурс работы ленточных пил определяется их несущей способностью, от которой зависит производительность ленточнопильного оборудования, качество и себестоимость выпускаемой продукции.

Под несущей способностью ленточных пил понимают их свойство удерживать заданную траекторию движения зубьев в пропиле, то есть обеспечивать условия прочности, жёсткости, устойчивости, а также циклической долговечности по пределу выносливости. До настоящего времени ресурс работы ленточных пил определяется по их сопротивлению усталости через коэффициент запаса прочности n, [1, 2]:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a K_\sigma + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_в}\sigma_m}, \qquad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости материала пилы при симметричном цикле напряжений; σ_m – среднее напряжение цикла; $\sigma_a=\sigma_{max}-\sigma_m$ – амплитуда напряжений цикла; $\sigma_в$ – предел прочности материала пилы, (временное сопротивление на разрыв); K_σ – коэффициент концентрации местных напряжений при изгибе и растяжении пилы на шкивах.

При использовании формулы (1) считается, что если $n \geq 1{,}5$, то ленточная пила проработает бесконечно долгое число циклов N (как минимум 10^7). Однако при этом не учитываются очень важные положения:

1. За период стойкости пилы по мере затупления зубьев силы резания увеличиваются в 2,2...2,6 раза, что естественным образом увеличивает амплитуду напряжений цикла σ_a.
2. Среднее напряжение цикла σ_m при длительной работе пилы постепенно увеличивается, так как в процессе переточек уменьшается поперечное сечение пилы, а, следовательно, и момент инерции сечения. Это связано с тем, что прилагаемые внешние нагрузки (силы резания, усилие натяжения пилы) остаются прежними.

Попытки введения в формулу (1) дополнительных коэффициентов, учитывающих "паузы отдыха" пил, тепловые воздействия и др., усложняет ее практическое использование, а также расширяет диапазон рассеивания получаемых значений, что ставит под сомнение достоверность проводимых расчетов.

Чтобы знать рациональный период эксплуатации ленточных пил, необходимо точно определять их ресурс работы по циклической долговечности, выраженный числом периодов стойкости режущих элементов (зубьев). При этом, как правило, число периодов стойкости соответствует числу возможных переточек зубьев пил с учетом первой заточки. Особенность работы ленточных пил при распиловке древесины заключается в том, что за период стойкости их амплитуды напряжений изменяются во времени от минимальных к максимальным по мере затупления режущих элементов. При этом закон распределения амплитуд средних напряжений цикла за период стойкости пилы соответствует закону изменения энергетических показателей резания древесины и носит нормально-логарифмический характер. Эмпирическую функцию плотности вероятности нормально-логарифмического распределения амплитуд напряжений можно представить в виде [3]:

$$f(\sigma_i) = \sigma_{ан}(1 - \ln t_i),$$

где $\sigma_{ан}$ – амплитуда напряжений вновь заточенной ленточной пилы (определяется известными методами [3, 4]); t_i – время с момента начала работы пилы после заточки зубьев до затупления.

Совокупность амплитуд напряжений за период стойкости режущих элементов пилы будет составлять блок нагружения [5, 6]. Количество блоков нагружения за срок службы ленточной пилы будет определять ее ресурс работы по циклической долговечности. Особенностью блока нагружения является то, что амплитуды средних напряжений цикла возрастает не непрерывно, а с "паузами отдыха" при холостом ходе и остановках станков. При этом, кроме силовых и тепловых воздействий при работе пил, на них действуют древесные органические кислоты, усиливающие скорость роста усталостных трещин. Кроме этого, необходимо учитывать уменьшение площади поперечного сечения пил при переточках на 0,5...1,5 %, а, следовательно, автоматически будет увеличиваться начальная амплитуда напряжений $\sigma_{ан}$ в последующих блоках нагружения по отношению к предыдущим.

Для ленточной пилы можно составить два типа блоков нагружения, используя данные работ [7, 8].

Один тип блока нагружения будет состоять из 20...30 тыс. циклов со спектром нагружения в 40...60 ступеней, каждая из которых будет содержать соответственно 500...700 циклов работы [5, 6]. Такой тип блока нагружения характерен для ленточнопильных станков проходного и циклопроходного типов и отличается небольшим периодом работы ленточной пилы в режиме "пуск – стоп". Второй тип блока нагружения аналогичен первому, но для каждой ступени спектра нагружения будет присутствовать режим работы "пуск – стоп", который отличается значительным всплеском напряжений в ленточной пиле [8] в момент пуска. Такой тип блока нагружения характерен для ленточнопильных станков позиционного и циклопозиционного типов. Для определения средних амплитуд напряжений за цикл работы, составим схему нагружения по нормальным и касательным напряжениям, используя данные работ [7, 8]. Для этого на ленточной пиле (рис. 1) необходимо выделить следующие участки:

- 1–2 – действие нормальных и касательных напряжений на ведущем шкиве от передачи тягового усилия;
- 1–3 – нормальные напряжения от растяжения и изгиба пилы на ведущем шкиве,
- 3–4 – нормальные напряжения от растяжения в холостой ветви ленточной пилы,
- 4–5 – нормальные и касательные напряжения на ведомом шкиве от передачи тягового усилия;
- 4–6 – нормальные напряжения от растяжения и изгиба пилы на ведомом шкиве,
- 6–7 – нормальные и касательные напряжения от растяжения и отжима пилы подвижным направляющим роликом,
- 7–8 – нормальные и касательные напряжения от растяжения и сил резания,
- 8–1 – нормальные и касательные напряжения от растяжения и отжима пилы неподвижным направляющим роликом.

Далее, после определения средних амплитуд цикла, можно составить блок нагружения. При этом количество блоков нагружения в соответствии с ГОСТ 25.507-85 [5] должно быть не менее десяти за весь период работы.

Расчет среднего ресурса работы ленточной пилы по циклической долговечности необходимо проводить, используя корректированную линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений [3, 4]. Вначале определяем коэффициент a_p, корректирующий линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений:

$$a_p = \sum_{i=1}^{c} \frac{n_i}{N_i},$$

где c – номер первого уровня амплитуды напряжения σ_{ai} элемента ленточной пилы (межзубовой впадины), которая превышает предел выносливости σ_i материала пилы; n_i – общее количество циклов повторения амплитуд σ_{ai} за весь срок службы ленточной пилы; N_i – число циклов до появления усталостного разрушения (начала развития трещины) при действии напряжений с амплитудой σ_{ai}.

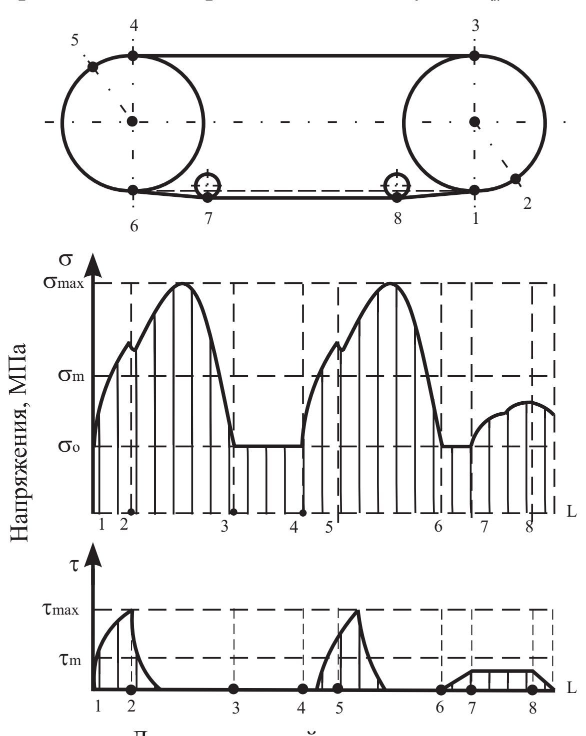


Рис. 1. *Схема участков в ленточной пиле с графиками характера изменения нормальных и касательных напряжений за один цикл работы зуба, где σ, τ — нормальные и касательные напряжения (для расчетов принимают в МПа), L — полная длина сваренной ленточной пилы (при расчетах принимают в мм)*

Физический смысл коэффициента, корректирующего линейную гипотезу суммирования усталостных повреждений, заключается в определении значения суммы относительных повреждений (то есть суммируются только циклы от повреждающих амплитуд напряжений). Общее количество циклов повторения амплитуд i-того уровня σ_{ai} за срок службы ленточной пилы

$$n_i = \gamma_{i\sigma} \cdot \lambda,$$

где λ – число блоков нагружения, соответствующее числу периодов стойкости ленточной пилы; $\gamma_{i\sigma}$ – число циклов повторения амплитуд σ_{ai} в блоке нагружения.

Для ленточных пил: $\gamma_{i\sigma}=\eta_i \cdot t_i$, где η_i – частота цикла работы пилы; t_i – время в мин с момента начала работы пилы после заточки до затупления (период блока нагружения).

Ресурс работы ленточной пилы по циклической долговечности, выраженный числом блоков нагружения (периодов стойкости) λ до появления усталостного разрушения, определяется выражением [4] :

$$\lambda = \frac{a_p \cdot \sigma_{-1d}^{m} \cdot N_G}{\sum\limits_{(\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1d})} \sigma_{ai}^{m} \cdot \gamma_{i\sigma}}, \quad (2)$$

где N_G – число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости; σ_{-1d} – предел выносливости ленточной пилы.

Данные величины определяются из уравнения кривой усталости [4, 9]:

$$m\lg\sigma_{ai} + \lg N_i = m\lg\sigma_{-1d} + \lg N_G, \quad \text{или}$$

$$\sigma_{ai}^m \cdot N_i = \begin{cases} \sigma_{-1d}^m \cdot N_G & \text{при} \quad \sigma_{ai} \ge \sigma_{-1d} \\ \infty & \text{при} \quad \sigma_{ai} < \sigma_{-1d} \end{cases}, \qquad (3)$$

Для практических расчётов ресурса работы ленточных пил величину N_G можно принимать равной 10^6 циклов. Параметр кривой усталости m в соответствии с ГОСТ 25.504-82 [9] принимают приближённо в виде: $m=C/K$, где K – суммарный коэффициент, учитывающий влияние всех факторов на снижение предела выносливости (качество обработки поверхности, концентрацию напряжений, коррозионные воздействия и др.). Определяется в соответствии с ГОСТ 25.504-82 [9]; C – эмпирический коэффициент, характеризующий несущую способность материала пилы [3, 4, 9].

Условие прочности ленточных пил определяется выражением [3, 4]:

$$\sigma_{-1d} = \sqrt[m_\sigma]{\frac{\lambda_\sigma}{a_p \cdot N_G} \cdot \sum_{(\sigma_{ai} \ge \sigma_{-1d})} \sigma_{ai}^m \cdot \gamma_{i\sigma}}, \qquad (4)$$

Индекс $\sigma_{ai} \ge \sigma_{-1d}$ под знаком суммы в уравнениях (2) и (4) показывает, что суммирование в этих выражениях следует производить только по амплитудам σ_{ai}, превышающим предел выносливости ленточной пилы σ_{-1d}, ибо при $\sigma_{ai} < \sigma_{-1d}$, согласно зависимости (3) $N_i = \infty$.

Аналогично определяются касательные напряжения

$$\tau_{-1d} = \sqrt[m_\tau]{\frac{\lambda_\tau}{a_{p\tau} \cdot N_G} \cdot \sum_{(\tau_{ai} \ge \tau_{-1d})} \tau_{ai}^m \cdot \gamma_{i\tau}}. \qquad (5)$$

Общий ресурс работы ленточных пил при совместном действии касательных и нормальных напряжений, выраженный в количествах их установок в станок, определится из выражения [4]:

$$\lambda = \frac{\lambda_\sigma \cdot \lambda_\tau}{(\lambda_\sigma^{2/m} + \lambda_\tau^{2/m})^{2/m}}. \qquad (6)$$

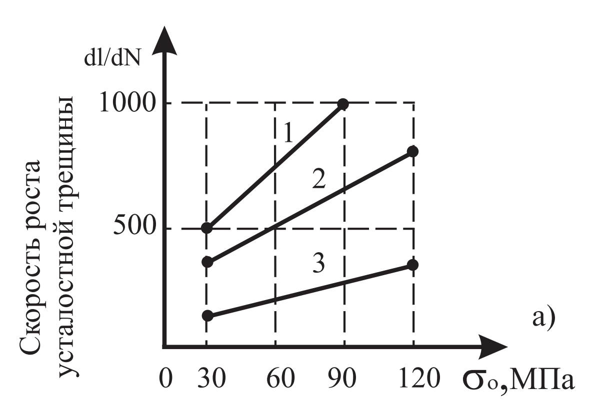
Таким образом, используя зависимости (2, 4–6), можно определять конкретное число возможных установок ленточных пил в станок, число их возможных переточек, предельные уровни нагружения пил в блоке и другие параметры. Данный метод определения ресурса работы ленточных пил по циклической долговечности, базирующийся на определении их сопротивления усталости, выраженный числом периодов стойкости пил и числом возможных переточек, носит более конкретный характер и более приемлем для практического использования, чем существующие ранее [2].

Так, например, для ленточных пил с размерами по ширине, толщине и длине в мм $b{\cdot}s{\cdot}l$=30·0,9·4000, используемых на горизонтальных ленточнопильных станках типа ЛГС-50, АМВ-169, "Wood-Miser" LT-40HD и др., было определено следующее предельное количество возможных переточек со снятием слоя металла по ширине пилы Δ=0,2...0,3 мм и количество установок пил в станок (таблица).

Распиливалась древесина сосны влажностью $W\approx$12...25 %, диаметрами в комле $D\approx$20...80 см, со скоростью резания $V_{рез}\approx$25...26 м/с, скоростью подачи $U\approx$4...12 м/мин. Период стойкости пил по объёму распиловки составлял $T\approx$1 м³ пиломатериалов. Как видно из таблицы, расхождение расчётных и практических данных не превышает 23 %, что является достаточно высоким показателем для таких расчётов.

Таблица. *Результаты наблюдений за долговечностью работы узких ленточных пил*

Материал пилы, HRC$_э$	Расчетное число блоков нагружения			Вероятность безотказной работы пилы после последней расчётной установки, %	Практическая долговечность пил по числу установок
	λ_σ	λ_τ	λ		
Сталь 9ХФ HRC$_э$41...44	23,3	1684	18,6	70	~20
Сталь У10А HRC$_э$43...47	18,7	268	10,9	39	~14



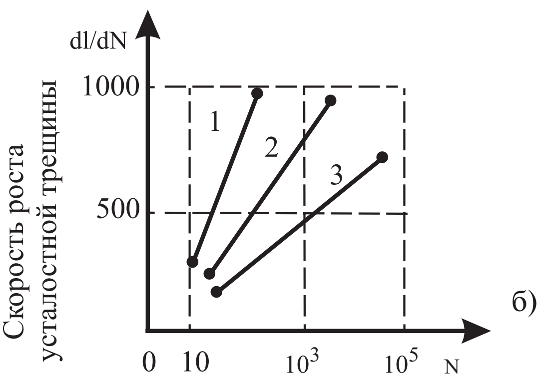


Рис. 2. *Графики зависимости скорости роста усталостных трещин dl/dN в мкм/цикл: а) от усилия предварительного натяжения σ_0 при длине надреза пилы: 1) 9 мм, (10 % от ширины пилы), 2) 6 мм, (20 %), 3) 3 мм, (30 %), б) от условий работы ленточных пил по числу циклов нагружения N при: 1) распиловке древесины (длина надреза пилы 6 мм), 2) крестообразном перекосе шкивов в 1,5 град, 3) работе ленточнопильного станка в режиме "пуск — стоп"*

Несмотря на то, что по касательным напряжениям ленточная пила может выдерживать достаточно большое количество блоков нагружения, их действие оценивать однозначно очень сложно и, по крайней мере, пренебрегать ими, как делалось ранее, [2] нельзя. Так, давно замечено [10], что ленточные пилы быстро выходят из строя из-за обрывов при:

– значении перекоса шкивов (крестообразном), друг относительно друга более 0,4...0,5 град,
– работе ленточнопильного станка в режиме "пуск – стоп",
– распиловке сучковатой, свилеватой и комлевой древесины, когда существенно возрастает осевая составляющая сил резания, (разность боковых сил на профилях вершин зубьев).

Во всех этих случаях можно отметить заметное влияние касательных напряжений на общее напряженное состояние ленточных пил. Для оценки влияния касательных напряжений на циклическую долговечность ленточных пил был поставлен специальный эксперимент. Для этого в межзубовых впадинах ленточных пил отрезным кругом толщиной 0,5 мм делались надрезы, имитирующие усталостные трещины, длиной 10...30 % от рабочей ширины полотна пилы. Затем пила устанавливалась на станок и определялось количество циклов работы до разрушения и скорость роста усталостных трещин в зависимости от различных факторов [11]. Результаты некоторых из этих испытаний представлены на рис. 2.

Как видно из графиков, на скорость роста усталостных трещин существенное влияние оказывают сила резания, перекос шкивов ленточнопильного станка друг относительно друга и работа станка в режиме "пуск – стоп". Это объясняется тем, что именно в этих условиях действуют максимальные значения "перерезывающих" касательных напряжений, которые определяют межкристаллитный сдвиг в материале растянутой ленточной пилы в процессе работы. Хотя ранее считалось [2], что напряжениями, определяющими обрыв пилы, являются нормальные напряжения от ее изгиба на шкивах. Нами же было установлено, что ленточные пилы с надрезами без отмеченных выше режимов нагружения могут проработать достаточно большое число циклов до разрушения ($\sim 10^4 – 10^6$ циклов), если испытывают только напряжения в режиме холостого хода [8], то есть от изгиба на шкивах, усилия предварительного натяжения и др. В этом случае скорость роста усталостных трещин незначительная. А в трех вышеперечисленных случаях идет интенсивный рост усталостных трещин, приводящий к обрывам ленточных пил.

Выводы

1. Прогнозировать наступление отказов ленточных пил вследствие обрывов можно, используя выводы корректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений в соответствии с ГОСТ 25.507-85, ГОСТ 25.101-83 и ГОСТ 25.504-82.
2. На скорость роста усталостных трещин, а следовательно и на циклическую долговечность ленточных пил до 20...25 % оказывают касательные напряжения <450 МПа.
3. Несмотря на то, что уровень касательных напряжений не превышает 3...5 % от общего напряженного состояния ленточных пил, их действие оказывает решающее значение, так как ленточная пила значительно нагружена нормальными напряжениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
2. Феоктистов А.Е. Ленточнопильные станки. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 152 с.
3. Когаев В.П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
5. ГОСТ 25.507-85. Расчёты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 31 с.
6. ГОСТ 25.101-83. Расчёты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 29 с.
7. Кондратюк А.А., Шилько В.К. Особенности формирования касательных напряжений при передаче рабочего движения в механизмах резания ленточнопильных станков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 134–136.
8. Кондратюк А.А., Шилько В.К. Оценка напряженного состояния ленточных пил // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 138–142.
9. ГОСТ 25.504-82. Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта характеристик сопротивления усталости. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 80 с.
10. Шилько В.К. Определение ресурса работы ленточных пил по несущей способности при распиловке древесины // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 1999. – № 1. – С. 176–182.
11. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла. – М.: Металлургия, 1973. – 215 с.